

LIGHT SOURCE DEVICE OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE LAMP

Patent Number: JP11317203

Publication date: 1999-11-16

Inventor(s): OKAMOTO MASASHI; HIROSE KENICHI

Applicant(s): USHIO INC

Requested Patent: JP11317203

Application Number: JP19980120336 19980430

Priority Number(s):

IPC Classification: H01J65/04

EC Classification:

Equivalents: JP3348648B2, TW544716

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a light source device of a dielectric barrier discharge lamp, capable of effectively forming excimer molecules and effectively operating as a vacuum ultraviolet light source.

SOLUTION: A dielectric barrier discharge lamp 1 is lighted up by applying a high frequency alternating voltage supplied from a feeder device 8 composed of a high frequency power supply 9 of a bridge system, a push-pull system, and a flyback system and a transformer Tr. In a case, such a voltage is applied to the dielectric barrier discharge lamp 1 in such a way that a differential time required from reaching of a largest maximum value till reaching of a next maximum value is set to be 3 μ s or less, after the time when reaching such a voltage that the dielectric barrier discharge is started. In another case, such a voltage may be applied to the dielectric barrier discharge lamp 1 in such a condition that the differential time from reaching of a voltage value that the dielectric barrier discharge is started, till reaching of a largest voltage at the time required when a new lamp voltage is applied is set to be 2.1 μ s.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(51) Int.Cl.
H 01 J 65/04

識別記号

F I
H 01 J 65/04

A

審査請求 未請求 請求項の数 3 OL (全 15 頁)

(21)出願番号 特願平10-120338

(22)出願日 平成10年(1998)4月30日

(71)出願人 000102212

ウシオ電機株式会社
東京都千代田区大手町2丁目6番1号 朝
日東海ビル19階

(72)発明者 岡本 昌士

兵庫県姫路市別所町佐土1194番地 ウシオ
電機株式会社内

(72)発明者 廣瀬 賢一

兵庫県姫路市別所町佐土1194番地 ウシオ
電機株式会社内

(74)代理人 弁理士 長澤 俊一郎

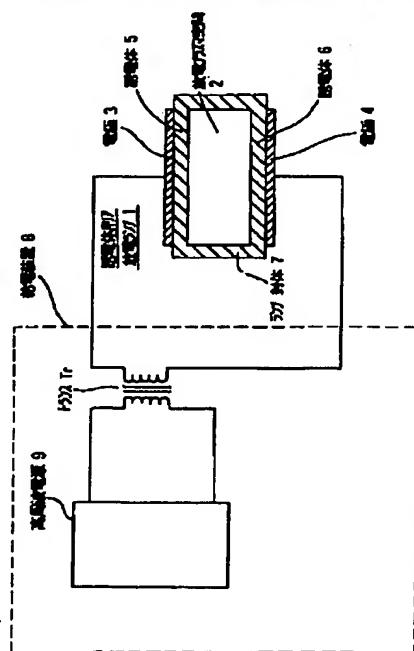
(54)【発明の名称】 誘電体バリア放電ランプ光源装置

(57)【要約】

【課題】 エキシマ分子を効率的に生成し、真空紫外光源として効率的に動作できる誘電体バリア放電ランプ光源装置を提供すること。

【解決手段】 ブリッジ方式、ブッシュブル方式、フライバック方式の高周波電源9とトランジスタT₁から構成される給電装置8から高周波交流電圧を印加して誘電体バリア放電ランプ1を点灯させる。その際、誘電体バリア放電ランプ1に、誘電体バリア放電を開始する電圧値に達した時点経過後、最大の極大値に達してから次の極大値に達するまでの時間が3μs以下となるような電圧を印加する。また、誘電体バリア放電ランプ1に、誘電体バリア放電を開始する電圧値に達してから、次に新たなランプ電圧が印加されるまでの期間における最大の電圧値になるまでの時間が2. 1μs以下となるような電圧を印加するようにしてもよい。

誘電体バリア放電ランプ光源装置の基本構成を示す図



【特許請求の範囲】

【請求項1】 誘電体バリア放電によってエキシマ分子を生成する放電用ガスが充填された放電プラズマ空間があつて、この放電用ガスに放電現象を誘起せしめるための両極の電極のうち少なくとも一方と前記放電用ガスの間に誘電体が介在する構造を有する誘電体バリア放電ランプと、この誘電体バリア放電ランプの前記電極に高電圧を印加するための給電装置とを有する誘電体バリア放電ランプ光源装置において、

前記給電装置は昇圧トランスを介して前記誘電体バリア放電ランプに概略周期的な波形の高電圧を印加するものであつて、

この印加された電圧波形は、誘電体バリア放電を開始する電圧値に達した後に、最大の極大値に達してから次の極大値に達するまでの時間が $3\mu s$ 以下であることを特徴とする誘電体バリア放電ランプ光源装置。

【請求項2】 誘電体バリア放電によってエキシマ分子を生成する放電用ガスが充填された放電プラズマ空間があつて、この放電用ガスに放電現象を誘起せしめるための両極の電極のうち少なくとも一方と前記放電用ガスの間に誘電体が介在する構造を有する誘電体バリア放電ランプと、この誘電体バリア放電ランプの前記電極に高電圧を印加するための給電装置とを有する誘電体バリア放電ランプ光源装置において、

上記給電装置は昇圧トランスを介して前記誘電体バリア放電ランプに概略周期的な波形の高電圧を印加するものであつて、

この印加された電圧波形が、誘電体バリア放電を開始する電圧値に達してから、次に新たなランプ電圧が印加されるまでの期間における最大の電圧値になるまでの時間が $2.1\mu s$ 以下であることを特徴とする誘電体バリア放電ランプ光源装置。

【請求項3】 誘電体バリア放電によってエキシマ分子を生成する放電用ガスが充填された放電プラズマ空間があつて、この放電用ガスに放電現象を誘起せしめるための両極の電極のうち少なくとも一方と前記放電用ガスの間に誘電体が介在する構造を有する誘電体バリア放電ランプと、この誘電体バリア放電ランプの前記電極に高電圧を印加するための給電装置とを有する誘電体バリア放電ランプ光源装置において、

前記給電装置は昇圧トランスを介して前記誘電体バリア放電ランプに概略周期的な波形の高電圧を印加するものであつて、

上記給電装置と誘電体バリア放電ランプから構成される回路のインダクタンスを L 、静電容量を C としたとき、該インダクタンス L 、静電容量 C が下記の式を満たすように選定されている

$$LC \leq 2.8 \times 10^{-13}$$

ことを特徴とする誘電体バリア放電ランプ光源装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、例えば、光化学反応用の紫外線光源として使用される放電ランプの一種で、誘電体バリア放電によってエキシマ分子を形成し、前記エキシマ分子から放射される光を利用するいわゆる誘電体バリア放電ランプを含む光源装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 本発明に関連した誘電体バリア放電ランプに関する技術を開示した技術文献として、例えば特開平2-7353号公報がある。該公報には、放電容器にエキシマ分子を形成する放電用ガスを充填し、誘電体バリア放電によってエキシマ分子を形成せしめ、前記エキシマ分子から放射される光を取り出す放射器が記載されている（誘電体バリア放電：別名オゾナイザ放電あるいは無声放電、電気学会発行改定新版「放電ハンドブック」平成1年6月再版7刷発行第263ページ参照）。誘電体バリア放電ランプには、放電プラズマ空間を挟んで電極の間に、1枚または2枚の誘電体が存在する。図19(a)は、2枚の誘電体5, 6が存在する誘電体バリア放電ランプ1を示している。因みに、図19(a)ではランプ封体7が、誘電体5, 6を兼ねている。

【0003】 誘電体バリア放電ランプ1を点灯させる際は、その両極の電極3, 4に、例えば、 $10\text{ kHz} \sim 200\text{ kHz}$ 、 $2\text{ kV} \sim 10\text{ kV}$ の高周波の交流電圧を印加する。ところが放電プラズマ空間2と電極3, 4の間に介在する誘電体5, 6のため、電極3, 4から放電プラズマ空間2に直接に電流が流れるのではなく、誘電体5, 6がコンデンサの働きをすることによって電流が流れる。すなわち、各誘電体5, 6の放電プラズマ空間2側の面には、各電極3, 4側の面と等量逆符号の電荷が誘電体の分極により誘起され、放電プラズマ空間2を挟んで対向する誘電体5, 6の面の間で放電する。

【0004】 誘電体5, 6の放電プラズマ空間2側の面に沿っては電流があまり流れず、放電が生じた部分では、誘電体5, 6の放電プラズマ空間2側の面に誘起された電荷は、放電により移動した電荷により中和され、放電プラズマ空間2の電界が減少する。このため、電極3, 4への電圧印加が継続されても、放電電流はやがて停止してしまう。ただし、電極3, 4への印加電圧がさらに上昇する場合は、放電電流は持続する。一度放電が生じた後、放電が停止した場合は、電極3, 4に印加される電圧の極性が反転するまで、再放電しない。例えばキセノンガスを封入した誘電体バリア放電ランプの場合、キセノンガスは、放電によりイオンと電子に分離し、キセノンプラズマとなる。このプラズマ中で、特定のエネルギー準位に励起されたキセノンが結合し、エキシマ分子が形成される。キセノンエキシマは、ある寿命時間を経過すると解離してしまうが、このときに開放されるエネルギーが真空紫外波長の光子として放出される。誘電体バリア放電ランプを真空紫外光源として効率

的に動作させるためには、このエキシマ分子形成を効率的にする必要がある。

【0005】ここで、放電時に効率的なエキシマ分子形成を阻害する大きな要因は、放電プラズマをエキシマ分子形成に寄与しないエネルギー準位へ励起してしまうことである。放電開始直後の放電プラズマの電子運動は集団的であり、エネルギーは高いが温度は低い状態にある。この状態では、放電プラズマは、エキシマ分子を形成するために必要な、共鳴状態に遷移する確率が高い。しかし放電時間が長くなると、プラズマの電子運動は次第に熱的、すなわち、マックスウェルボルツマン分布と呼ばれる熱平衡状態になり、プラズマ温度が上昇し、エキシマ分子を形成できないような、より高い励起状態に遷移する確率が上昇してしまう。

【0006】さらに、エキシマ分子が形成された場合でも、寿命時間の経過を待つて所期の光子を放出して自然に解離する前に、後続の放電により、エキシマ分子が破壊される場合もある。実際、キセノンエキシマの例では、放電開始から真空紫外波長の光子放出まで、 $1\text{ }\mu\text{ s}$ 程度の期間を要し、この期間内の後続の放電や再放電は、エキシマ発光の効率を低下させる。すなわち、一度放電が開始したならば、後続する放電のエネルギーはできるだけ小さくすることが最も重要であることがわかる。

【0007】放電時間が短い場合であっても、その放電期間に注入されるエネルギーが大き過ぎると、同様に高い励起状態に遷移する確率が上昇してしまう。高い励起状態に遷移したプラズマは、赤外線を放射して緩和し、ランプの温度を上昇させるだけで、エキシマ発光に寄与しない。すなわち、エキシマ分子形成に寄与しないエネルギー準位への放電プラズマの励起を抑制するような放電駆動を行わなければならないのである。この点で、従来の誘電体バリア放電ランプ光源装置は満足できるものではなかった。

【0008】誘電体バリア放電を含む、全てのパルス放電によるエキシマ発光の高効率化を達成しようとする提案として、特開平1-243363号公報がある。これは、一度放電が開始したならば、後続する放電のエネルギーはできるだけ小さくすること、という前記の条件に沿うものである。しかし、この提案に記載されているものは、どういうパラメータを調整すればエキシマ発光が高効率化できるか、についてであって、そのパラメータ値の効果的な条件については、具体的には何ら示されていない。とりわけ、誘電体バリア放電の場合は、放電プラズマ空間への電圧印加や電流注入は誘電体を介して行わなければならないため、この電圧や電流の制御の自由度が低く、最適条件を見出すことは非常に困難である。

【0009】誘電体バリア放電ランプの効率を改善しようとする提案として、例えば、特表平8-508363公報がある。しかし、この提案においては、前記のエキ

シマ分子形成を効率的にするための、エキシマ分子形成に寄与しないエネルギー準位への放電プラズマの励起を抑制することの達成に真に効果的な、具体的な事項は何ら述べられていない。また、誘電体バリア放電を利用した蛍光灯の駆動波形に関する改善提案として、例えば、特開平6-163006号公報がある。これによると、正負極性の矩形パルス列や交流の矩形波で駆動することにより、蛍光灯の輝度が向上するということが述べられている。この中では、矩形パルス列や矩形波について、周波数やデューティ比に関連して、印加電圧の変化に対する輝度の変化の実験結果が記載されており、従来の正弦波駆動と比較した効率の向上の説明がなされている。

【0010】しかし、現実の給電装置においては、高電圧トランスなどが含まれ、理想的な矩形パルス列や矩形波を印加することは不可能であり、給電装置の出力インピーダンスとランプのインピーダンスの相互作用により、波形は鈍化するし、また、部分的には共振により正弦波的電圧が印加されてしまう。このような現実の給電装置における、理想的な矩形的波形からのズレがあった場合に、ズレのなかの如何なる成分は有害で、どの程度のズレまで許容できるかを明確にしない限り、経済的に見合う実用的な光源装置を設計、製作することはできない。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】本発明は上記した事情に鑑みなされたものであって、その目的とするところは、エキシマ分子を効率的に生成し、真空紫外光源として効率的に動作できる誘電体バリア放電ランプ光源装置を提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】本願発明の課題であるエキシマ分子を効率的に形成するためには、エキシマ分子の形成に寄与しないエネルギー準位への放電プラズマの励起を抑制することである。そして、このためには、ランプ印加電圧が有限の増加率で上昇し、放電開始電圧に達して放電が開始されれば、できるだけ速やかに放電を終了させればよい。誘電体バリア放電ランプ1の電気回路的な動作を図19 (b) で説明する。図19 (b) に示すように、放電プラズマ空間2の放電路は、抵抗10とスイッチ11を直列に接続したものとなる。また、誘電体バリア放電ランプ1には、電極3、4と放電プラズマ空間2の間に誘電体5、6があり、これは電気回路的にはコンデンサとして働く。ただし、誘電体が2枚の場合は、それぞれのコンデンサを直列合成した1個のコンデンサ13と考えられる。

【0013】このコンデンサが放電プラズマ空間2に対して直列に挿入された構造であるため、誘電体バリア放電ランプ1にはランプ印加電圧の極性が変化した直後のある期間内にのみ放電電流が流れ、ランプ印加電圧を実質的に零とした休止期間を有するパルス電圧を印加せず

とも、自然に放電の休止期間が生ずる。また、放電プラズマ空間2の電圧が放電開始電圧に達しない限り、放電は生じない。放電プラズマ空間2自体もコンデンサ12を形成しており、放電が開始されれば、このコンデンサに充電されたエネルギーのほとんどが放電に費やされるため、給電装置は、放電開始以降に誘電体バリア放電ランプ1に必要以上の電流を追加して流さないようなものとすればよいことがわかる。

【0014】次に、ランプ壁面の単位面積あたりについて考える。放電開始電圧は、ガス圧と放電ギャップの間隔が決まればほとんど自動的に決まる。また、放電プラズマ空間が形成するコンデンサ12の静電容量C1は、放電ギャップ間隔により決まるため、1発の放電が開始してから終了するまでの期間にプラズマに与えられる最小エネルギーは、放電プラズマ空間が形成するコンデンサ12に充電された電荷が全て放電するエネルギーであり、これはランプの構造により決まってしまう。前記のエキシマ分子形成を効率的にするため、エキシマ分子形成に寄与しないエネルギー準位への放電プラズマの励起を抑制することは、この最小エネルギーの放電の条件において、最も良く達成されることになる。

【0015】ところが、この最小エネルギーの放電の条件とは、極めて大きな出力インピーダンスを有する給電装置を用いて、ランプ印加電圧を極めてゆっくりと上昇させ、放電させることにより、原理的には実現可能である。しかし、このような給電装置は、実際の光源装置として応用する場合には問題がある。第1の問題は、出力インピーダンスが大きいと、周期的な繰返し放電のための、高速の動作速度が得られないことである。第2の問題は、この最小エネルギーの放電の条件では、放電ギャップ間隔のランプ内の位置的不均一の影響による1個のランプ内での放電の不均一が生じることがある点である。従って、必要な光量を実現可能なような小さい出力インピーダンスを有する給電装置を使用し、かつ、誘電体バリア放電ランプの全壁面において均一に放電を生じせしめる余裕を持たせた実用的な光源装置とする等のために、前記最小エネルギーの放電の条件よりもランプ印加電圧を高くする必要がある。ただし、ランプ印加電圧を高くする程度については、それによるエキシマ発光の効率低下が容認可能な範囲に抑えておくべきである。

【0016】すなわち、ランプ印加電圧のピーク値は、放電不均一が実用上無視できるための下限値を基準として、その2倍以下、望ましくは1.5倍以下に抑えるべきである。または放電が維持できるための下限値を基準として、その3倍以下、望ましくは2.5倍以下に抑えるべきである。なお、ランプ電力を増加する場合は、ランプ印加電圧を上げるのではなく、ランプ電源の駆動周波数を上げることにより行うべきである。ランプ電流は、ランプ印加電圧の反転の度毎に一定量が流れため、ランプ電力は駆動周波数に比例することになる。よ

って、上記駆動周波数を上げることにより、ランプ印加電圧上昇による効率の悪化を伴わずにランプ電力を増加することができる。

【0017】誘電体バリア放電ランプ光源装置の基本構成を図1に示す。同図において、1は前記した誘電体バリア放電ランプ、8は給電装置であり、給電装置8は、プリッジ方式、ブッシュプル方式、もしくは、フライバック方式等の高周波交流電源9と、昇圧トランスTrから構成される。実用的な給電装置における、ランプ印加電圧E(t)、放電ギャップ電圧（すなわち放電プラズマ空間2の電圧）V1(t)、ランプ電流Is(t)、および、放電電流Id(t)の典型的な波形を図2に示す（同図はフルプリッジ方式の給電装置を基本に、回路とランプをモデル化して計算機シミュレーションにより求めた波形であり、ハーフプリッジやブッシュプル方式の給電装置においても基本的に同様である）。なお、放電電流Id(t)については、前記図19(b)の抵抗10に流れるランプ内電流であるため、その波形を直接測定することはできないが、ランプ印加電圧E(t)とランプ電流Is(t)の波形データを測定することができれば、前記図19(b)に示した放電プラズマ空間2のコンデンサ12の静電容量C1、誘電体5、6のコンデンサ13の静電容量C2、誘電体バリア放電ランプに並列に存在する浮遊静電容量C3から算出することができる。

【0018】すなわち、放電プラズマ空間2のコンデンサ12の静電容量C1、誘電体5、6のコンデンサ13の静電容量C2、それに誘電体バリア放電ランプに並列に存在する浮遊静電容量C3により決まる、2個の係数F = 1 + C1 / C2 および Cv = C1 + C3 · F を用いれば、放電電流波形 Id(t)は次式(1)により求めることができる。

$$Id(t) = F \cdot Is(t) - Cv \cdot dE(t) / dt \quad (1)$$

この方法は、数値微分を使用するため、得られた結果の波形のなかの電流値の小さい領域における精度はあまり良くないが、放電開始時は速い立ち上がりを示すため、これを見出す目的で使用する限り問題はない。

【0019】図2において、ランプ印加電圧E(t)の極性が急変すると、放電ギャップ電圧V1(t)も急変し、これが放電開始電圧に達した点G1で放電が開始する。放電が開始すると、放電電流波形J1（図2の放電電流Id(t)波形参照）が急激に現われ、その結果、放電ギャップ電圧V1(t)は急激に低下する。この放電ギャップ電圧V1(t)（すなわち放電プラズマ空間の電圧）の急激な低下分に応じて、ランプ印加電圧E(t)も低下し、屈曲点Kが生ずる。放電電流が停止する点J2に対応するランプ印加電圧波形上の点は、その絶対値の極大点P1、またはそれを少し過ぎたあたりに存在する。実際の光源装置に対する評価においては、上記点は前記絶対値の極大点P1に存在するものとできる。以降、屈曲点Kまでのランプ印加電圧波形の変化は、C2 / (C1 + C2) 倍に

縮小されて、放電ギャップ電圧 $V_1(t)$ 波形にそのまま現れる。ここで、C1とC2は、前記した放電プラズマ空間2のコンデンサ12の静電容量C1と、誘電体5、6のコンデンサ13の静電容量C2である。電極3、4の両方に誘電体5、6が存在する誘電体バリア放電ランプの場合は、C2は、それぞれの誘電体の単独の静電容量が直列合成されたものと考えられる。

【0020】ここで、実用的な給電装置において、ランプ印加電圧に図2のような屈曲点Kが生ずる理由は次の通りである。上記した放電ギャップ電圧 $V_1(t)$ (すなわち放電プラズマ空間の電圧) の急激な低下分に応じて、ランプ印加電圧 $E(t)$ も低下しようとする。このランプ印加電圧 $E(t)$ 低下分は給電装置8が補償しようとするが、昇圧トランス T_r の磁束漏洩やケーブルのインダクタンスに起因する、誘導性の出力インピーダンスが存在するため、ランプ印加電圧低下分の補償が遅れ、その結果として、絶対値の大きい方向に凸の屈曲点Kが生ずる。また、この誘導性の出力インピーダンスと誘電体バリア放電ランプ1の静電容量との共振により、屈曲点Kの後にランプ印加電圧に対する振動成分が混入する。その結果、ランプ印加電圧波形上に絶対値の極小点や絶対値の極大点が生じることがある。以下、上記屈曲点Kの後に生ずる振動をリングングといい、その周波数をリングング周波数 F_r という。また、上記屈曲点Kで放電が開始してから印加電圧 $E(t)$ がピークにいたるまでの時間を τ とし、屈曲点Kの後に現れるピーク P_1 から次のピーク P_2 までの時間を T_{12} とする。

【0021】本発明は、上記屈曲点K以後のランプ印加電圧波形の変化に着目し、紫外線発光効率を低下させることなく、誘電体バリア放電ランプに有効に電力を投入するようにしたものである。すなわち、前記したようにランプ印加電圧 $E(t)$ 波形が急激な上昇または下降することにより放電が発生したときエキシマ分子が生成され、生成されたエキシマ分子が解離して紫外線が発生するまでの期間に、更なる放電電流の追加があると、エキシマ分子が破壊する。したがって、放電電流を速やかに切断することが紫外線発光効率の点から望ましい。

【0022】しかしながら、図2に示したように上記屈曲点Kで放電が開始してから、ランプ印加電圧 $E(t)$ が第1のピークにいたるまでは放電電流が持続してしまう。このため、放電が開始してから印加電圧がピークに達するまでの時間 τ が長い場合には、結果的に紫外線発生効率が低下する。また、屈曲点Kの後にリングングが発生する状態では、その電圧ピークにいたるまでは放電電流が持続してしまう。そして、このリングング周波数が低い場合には、放電電流が停止するまでに時間を要し、結果的に紫外線発光効率が低下する。すなわち、上記した放電が開始してから印加電圧がピークに達するまでの時間 τ を短くするか、もしくは、リングング周波数 F_r を高くすることにより、紫外線発光効率を低下させ

ることなく、誘電体バリア放電ランプを放電させることができる。

【0023】ここで、上記放電が開始してから印加電圧 $E(t)$ がピークに達するまでの時間 τ およびリングング周波数 F_r は、概ね給電装置8と誘電体バリア放電ランプ1から構成される回路のインダクタンス L と静電容量 C により定まり、これらの値小さくすることにより、時間 τ を短くすることができ、また、リングング周波数が高くすることができる。ここで、第1のピーク P_1 を過ぎたあたりで放電は終了しているので(即ち、この時点では前記図19(b)におけるスイッチ11は開いている)、第1のピーク P_1 を過ぎると、前記図19(b)に示したコンデンサ12、13の静電容量と浮遊容量、および回路のインダクタンス L でできる振動周波数で印加電圧波形 $E(t)$ は振動的に変化する。上記のように第1のピーク P_1 を過ぎた直後で放電は終了しているため、上記第1のピーク P_1 ～第2のピーク P_2 までの時間 T_{12} は、概ね上記したコンデンサ12、13の静電容量と浮遊容量、および回路のインダクタンス L でできる振動周波数の周期に相当する。

【0024】一般にLC共振回路の共振周波数は次の式で計算できる。

$$LC = 1 / (2\pi f)^2$$

したがって、上記回路のインダクタンスを L 、静電容量を C とすると、上記リングング周波数 F_r は、概ね、 $1 / (2\pi \times \sqrt{LC})$ で定まり、静電容量 C の値は誘電体バリア放電ランプ1の静電容量に依存するので、リングング周波数 F_r を高くする(時間 τ を短くする)には、上記インダクタンス L の値を小さくすればよい。具体的には、昇圧トランス T_r の結合インピーダンスを小さくすることにより、リングング周波数 F_r は高くすることができる。上記考察に基づき、本発明者等は、上記時間 τ 、ピーク P_1 ～ P_2 までの時間 T_{12} と紫外線発光効率との関係、およびリングング周波数と紫外線発光効率との関係を調べた。その結果、後述する図8、9、10に示すように、上記時間 τ を $\tau \leq 2.1 \mu s$ 、上記時間 T_{12} を $T_{12} \leq 3 \mu s$ 、もしくは、リングング周波数 F_r を $F_r \geq 300 \text{ kHz}$ とすれば、紫外線発光効率を低下させることなく、誘電体バリア放電ランプを放電させることができることがわかった。

【0025】ここで、前記したようにリングング周波数 F_r は、概ね、 $1 / (2\pi \times \sqrt{LC})$ で定まるので、上記LCの値を、 $LC \leq 2.8 \times 10^{-13}$ [Cの単位はF(ファラッド)、Lの単位はH(ヘンリー)]とすればよい。上記LCの値は、概ねランプ1の静電容量とトランス T_r のインダクタンスで定まるので、LCの値が上記条件を満たすようにランプ1の静電容量に応じて、トランス T_r のインダクタンスを選定すればよい。上記静電容量 C の測定は、消灯状態のランプ単体の静電容量をインピーダンスマータ等により測定すればよい。

また、Lの測定については、点灯時の放電が終了した直後の状態に準じて、トランスTrの一次側の状態を模擬的に再現した上で、2次側のインダクタンスをインピーダンスマータ等によって測定すればよい。

【0026】例えば、フルブリッジ方式もしくはハーフブリッジ方式の高周波交流電源を用いる場合には、トランスの一次側を短絡した状態で、2次側のインダクタンスを測定すればよい。また、ブッシュブル方式の場合には、トランスTrの一次側の中点と一端を短絡し、他端は開放した状態で、2次側のインダクタンスを測定すればよい。さらに、フライバック方式の場合には、トランスTrの一次側を開放した状態で、2次側のインダクタンスを測定すればよい。なお、使用する給電装置8によっては、前記した屈曲点Kが印加電圧波形上に明確に現れない場合がある。特にフライバック方式の電源を用いた場合には、印加電圧波形上に上記屈曲点が明確に現れない場合が多い。この場合には、前記したように放電電流波形Id(t)を算出し、その立ち上がりの急峻な部分に屈曲点があると推定すればよい。

【0027】本発明請求項1～3に記載された発明は、上記に基づき、誘電体バリア放電ランプを効率良く放電させるための実用的な条件を規定したものであり、以下のいずれかの条件を満たすことにより、誘電体バリア放電ランプを効率良く放電させることができる。

(1) 誘電体バリア放電を開始する電圧値に達した時点経過後、最大の電圧値に達してから次の最大電圧値に達するまでの時間が $3\mu s$ 以下となる電圧を誘電体バリア放電ランプに印加する。

(2) 誘電体バリア放電を開始する電圧値に達してから、次に新たなランプ電圧が印加されるまでの期間における最大の電圧値になるまでの時間が $2.1\mu s$ 以下となる電圧を誘電体バリア放電ランプに印加する。

(3) 給電装置と誘電体バリア放電ランプから構成される回路のインダクタンスをL、静電容量をCとしたとき、該インダクタンスL、静電容量Cが下記の式を満たすように選定する。

$$LC \leq 2.8 \times 10^{-13}$$

【0028】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について説明する。図3は本発明の実施例の誘電体バリア放電ランプ点灯回路の一例を示す図であり、同図はフルブリッジ方式のインバータ回路を用いた誘電体バリア放電ランプ点灯回路の概略構成を示している。図4は上記点灯回路の動作を説明するための波形図であり、同図は例えばトランスの1次、2次間漏洩インダクタンスが無く放電現象が生じない容量性の負荷が接続された場合の波形を模式的に示している。同図において、Q1～Q4はスイッチング素子(例えばFET)、G1～G4はスイッチング素子Q1～Q4のゲート信号、Vpは昇圧トランスTr(以下、トランスTrと略記する)の一次側電

圧、VsはトランスTrの二次側電圧である。

【0029】図3の点灯回路の動作を図4により説明する。

(a) 第1ゲート信号G1、第4のゲート信号G4がオンになると、ゲート駆動回路GD1、GD4により第1のスイッチング素子Q1、第4のスイッチング素子Q4が導通状態になり(同図①)、トランスTrの1次側に直流電源DCより直流電圧が印加され(同図②)、トランスTrの2次側に電圧が発生し、誘電体バリア放電ランプ1に電圧が印加される(同図③)。

(b) 第1ゲート信号G1、第4のゲート信号G4がオフになると(同図④)、第1のスイッチング素子Q1、第4のスイッチング素子Q4が遮断状態となり、トランスTrの1次側電圧Vp、トランスTrの2次側電圧Vsは、トランスTrの漏洩インダクタンスと、トランスTrの2次側静電容量とから決まる共振周波数に関連した速さで不安定の変動を始める(同図⑤、⑥)。

(c) 第2ゲート信号G2、第3のゲート信号G3がオンになると、ゲート駆動回路GD2、GD3により第2のスイッチング素子Q2、第3のスイッチング素子Q3が導通状態になり(同図⑦)、トランスTrの1次側に上記(a)とは逆向きの直流電圧が印加され、トランスTrの2次側に上記(a)とは逆向きの電圧が発生し、誘電体バリア放電ランプ1に逆向きの電圧が印加される(同図⑨)。

(d) 第2ゲート信号G2、第3のゲート信号G3がオフになると(同図丸数字10)、第2のスイッチング素子Q2、第3のスイッチング素子Q3が遮断状態となり、トランスTrの1次側電圧Vp、トランスTrの2次側電圧Vsは、トランスTrの漏洩インダクタンスと、トランスTrの2次側静電容量とから決まる共振周波数に関連した速さで不安定の変動を始める(同図丸数字11、12)。

(e) 以下、(a)～(d)の動作を繰り返す。

【0030】図5、図6上記点灯回路における印加電圧波形E(t)、電流波形I(t)の実測データである。図6は図5の区間Y1部分を拡大したものであり、上記波形は、下記の条件で測定したものである。なお、この条件は、図3の点灯回路を最も効率よく点灯させることができる条件である。

・周波数: 33.9 kHz

・トランスTr

1次側インダクタンス: 1.42 mH

2次側インダクタンス: 204 mH

結合インピーダンス: 0.99955

・誘電体バリア放電ランプ

誘電体: 石英ガラス-厚さ1mm

放電ガス: キセノン-圧力33 kPa

放電ギャップ: 4.3 mm

50 非放電時のランプ静電容量: 84 pF

【0031】また、図7は図5、図6において、放電電流波形 $I_d(t)$ を解析計算し、印加電圧波形 $E(t)$ 、電流波形 $I_s(t)$ に加えて放電電流波形 $I_d(t)$ を示したものであり、図6の区間Y2部分を拡大して示している。上記解析計算の条件は次の通りである。

- ・放電プラズマ空間の静電容量: $C_1 : 97.2 \text{ pF}$
- ・誘電体の静電容量: $C_2 : 607 \text{ pF}$
- ・浮遊静電容量: $C_3 : 70 \text{ pF}$

図7においては屈曲点Kが明確に現れており、この点 T_d で放電電流波形 $I_d(t)$ が急速に立ち上がっていることからから屈曲点Kが放電開始時点であることが分かる。また、屈曲点Kから次の第1のピーク P_1 に達するまでの時間が前記した時間 τ であり、第1のピーク P_1 から第2のピークに達するまでの時間が前記した時間 T_{12} であり、上記第1のピーク P_1 以降、印加電圧波形 $E(t)$ は振動的に変化している。

【0032】図3の点灯回路において、トランス T_r の2次側にインダクタンスを追加してリング周波数(時間 τ もしくは時間 T_{12})を調整して点灯させ、発光効率を求めた。図8、図9、図10に上記のようにして求めた、発光効率と、時間 τ 、時間 T_{12} 、および、リング周波数 F_r の関係を示す。また、図11にリング周波数を250Hzに低下させたときの印加電圧波形 $E(t)$ 、電流波形 $I(t)$ を示す。図8、図9、図10から明らかなように、時間 τ が $2.1 \mu\text{s}$ 以下、時間 T_{12} が $3 \mu\text{s}$ 以下、もしくは、リング周波数 F_r が 300Hz 以上とすることが、効率を高くする観点から効果的であることがわかる。なお、図8、図9、図10における曲線a、b、cはランプ印加電圧を変えた場合の効率を示しており、ランプ印加電圧は曲線aの印加電圧を V_1 、曲線bの印加電圧を V_2 、曲線cの印加電圧を V_3 としたとき $V_1 < V_2 < V_3$ である。また、その時の相対光量は曲線aは1、曲線bは1.33、曲線cは1.67であった。

【0033】図12は他のランプ印加電圧 $E(t)$ 波形、電流 $I_s(t)$ 波形の実測データであり、同図は、放電開始を示す電圧の屈曲点Kが明確に現れない場合の一例を示している。上記のように屈曲点Kが明確に現れない場合には、前記したように放電プラズマ空間2のコンデンサ12の静電容量 C_1 、誘電体5、6のコンデンサ13の静電容量 C_2 、それに誘電体バリア放電ランプに並列的に存在する浮遊静電容量 C_3 より前記(1)式により放電電流波形 $I_d(t)$ を求めることにより放電開始時点を知ることができる。

【0034】図13は上記のように放電電流波形 $I_d(t)$ を解析計算し、上記印加電圧 $E(t)$ 波形、電流 $I_s(t)$ 波形とともに示した図である。なお、同図の実験条件および上記放電電流波形 $I_d(t)$ の解析条件は次の通りである。

- ・給電装置のインバータ方式: ブッシュブル方式

・解析条件

放電プラズマ空間の静電容量: $C_1 : 8.7 \text{ pF}$

誘電体の静電容量: $C_2 : 140 \text{ pF}$

浮遊静電容量: $C_3 : 10 \text{ pF}$

図13を見ると時間 T_d で放電電流波形 $I_d(t)$ が急激に立ち上がっており、この時点が放電開始時点であることがわかる。したがって、この時点 T_d に対応した印加電圧 $E(t)$ 波形上の点が屈曲点Kに相当し、時間 τ はこの屈曲点Kから次のピーク P_1 までの時間を計ることにより求めることができる。なお、この例では第1のピーク P_1 、第2のピーク P_2 は明瞭に現れており、時間 T_{12} は印加電圧波形 $E(t)$ から直ちに求めることができる。

【0035】図14は、ブッシュブル方式のインバータ回路を点灯回路に用いた構成例を示す図である。また、図15は上記点灯回路の動作を説明するための波形図であり、同図は前記と同様、例えばトランスの1次、2次間漏洩インダクタンスが無く放電現象が生じない容量性の負荷が接続された場合の波形を模式的に示している。同図において、 G_1, G_2 はスイッチング素子 $Q_1 \sim Q_2$ のゲート信号、 V_1, V_2 はトランス T_r の一次側電圧、 V_s はトランス T_r の二次側電圧である。図3の点灯回路の動作を図4により説明する。

【0036】(a) 第1ゲート信号 G_1 がオンになると、ゲート駆動回路 $G_D 1$ により第1のスイッチング素子 Q_1 が導通状態になり(同図①)、トランス T_r の1次側第1コイル L_1 に直流電源 D_C より直流電圧が印加される(同図②)。トランス1次側第1コイル L_1 とトランス2次側コイル L_s は向きが逆であるから、トランス2次側コイル L_s にはトランス1次側第1コイル L_1 と逆向きの電圧が発生し、誘電体バリア放電ランプ1に電圧が印加される(同図③)。

(b) 第1ゲート信号 G_1 がオフになると、第1のスイッチング素子 Q_1 が遮断状態になり、トランス1次側第1コイル電圧 V_1 、トランス1次側第2コイル電圧 V_2 、トランス2次側電圧 V_s は、トランス T_r の漏洩インダクタンスと、トランス T_r の2次側静電容量とから決まる共振周波数に関連した速さで不安定的変動を始める(同図⑤、⑥)。

(c) 第2ゲート信号 G_2 がオンになると、第2のスイッチング素子 Q_2 が導通状態になり(同図⑦)、トランス1次側第2コイル L_2 に直流電源 D_C より直流電圧が印加される(同図⑧)。トランス1次側第2コイル L_2 とトランス2次側コイル L_s は向きが同じであるから、トランス2次側コイル L_s にはトランス1次側第2コイル L_2 と同じ向きの電圧が発生し、誘電体バリア放電ランプ1に電圧が印加される(同図⑨)。

(d) 第2ゲート信号 G_2 がオフになると、第2のスイッチング素子 Q_2 が遮断状態になり(同図丸数字10)、トランス1次側第1コイル電圧 V_1 、トランス1次側第2

コイル電圧 V_2 、トランス 2 次側電圧 V_s は、トランス T_r の漏洩インダクタンスと、トランス T_r の 2 次側静電容量とから決まる共振周波数に関連した速さで不安定の変動を始める（同図丸数字 11, 12）。

(e) 以下、上記(a)～(d) の動作を繰り返す。

【0037】以上の説明から明らかのように、点灯回路としてブッシュブル方式のインバータ回路を用いた場合、誘電体バリア放電ランプへ印加される電圧波形は前記したフルブリッジ方式のインバータ回路を用いた場合とほぼ同様であり、前記と同様に時間 τ 、時間 $T_{1,2}$ 、および、リング周波数 F_r を求めることができる。また、図示しないが、ハーフブリッジ方式のインバータ回路を用いた場合も同様である。

【0038】図 16 はフライバック方式のインバータ回路を用いた点灯回路の構成例を示す図、図 17 はフライバック方式のインバータ回路を用いた点灯回路を用いた場合の誘電体バリア放電ランプへの印加電圧 $E(t)$ 波形、電流 $I_s(t)$ 波形の実測データである。図 17 に示すように、点灯回路としてフライバック方式のインバータ回路を用いた場合には、誘電体バリア放電ランプへの印加電圧 $E(t)$ 波形、電流 $I_s(t)$ 波形は、前記したフルブリッジ、ハーフブリッジ、ブッシュブル方式のインバータ回路を用いた場合とは大きく異なる。しかしながらフライバック方式のインバータ回路を用いた場合であっても、屈曲点 K 以後のランプ印加電圧波形の変化に着目することにより、前記と同様に効率良くランプを点灯させることができる。

【0039】以下、フライバック方式のインバータ回路を用いた点灯回路により誘電体バリア放電ランプを点灯させる場合について説明する。図 18 は、図 17 の波形および回路各部の波形をシミュレーションにより求めて模式的に示した図である。同図において、 $E(t)$ は図 16 においてトランス T_r の 2 次側電圧波形（誘電体バリア放電ランプ印加電圧波形）、 $I_s(t)$ はランプ電流波形、 $I_d(t)$ は前記した解析計算により求めた放電電流波形、 $V_q(t)$ はスイッチング素子（例えば FET）Q に加わる電圧波形、 $I_q(t)$ はスイッチング素子 Q に流れる電流波形、 $I_r(t)$ はダイオード D 1 に流れる電流波形、 $G(t)$ はゲート駆動回路 GD に入力されるゲート信号である。

【0040】図 17 に示す点灯回路の動作を図 18 により説明する。

(a) ゲート信号 $G(t)$ が時間 $t_1 \sim t_2$ の間だけオンになると、スイッチング素子 Q に流れる電流 $I_q(t)$ がほぼ直線的に増加して、時間 t_2 で突然遮断される。電流 $I_q(t)$ が切断される直前の電流に対応して、トランス T_r のコアに蓄えられていた磁気的エネルギーは、トランス T_r の一次、2 次側に電圧の形で現れ、トランス T_r の 2 次側には、トランス T_r の巻比に応じて昇圧された高電圧が現れ、誘電体バリア放電ランプ 1 に印加される。

(b) ランプ 1 に高電圧が印加されると、時刻 t_a でランプが放電し、印加電圧 E

(c) の波形に屈曲点 K_1 が生ずる。但し、図 18 では屈曲点 K_1 は明瞭に現れていない。放電が生ずると、放電空間の電圧は急速に中和され、ほとんど零になる。

(d) ランプ 1 の静電容量とトランス T_r の 2 次側インダクタンスとで概ね定まる共振周波数にて、ランプ印加電圧 $E(t)$ は共振振動を生ずる。

10 (e) ランプ印加電圧 $E(t)$ が低い電圧になると、時刻 t_a における放電によって放電空間の電圧が中和されたことに起因して、放電空間には逆方向の高電圧が発生する。これにより、時刻 T_b において、再放電が発生し、屈曲点 K_2 が生ずる。但し、図 18 では屈曲点 K_2 は明瞭に現れていない。

(f) ランプ印加電圧 $E(t)$ の共振振動は、トランス T_r の一次側にも現れるため、スイッチング素子 Q の電圧 $V_q(t)$ は、図 18 に示すように変動する。

20 【0041】(g) 上記電圧 $V_q(t)$ が正である期間は実質的にはトランス T_r の一次側には電流が流れない。しかし、スイッチング素子 Q に並列にダイオード D 1 が接続されている場合には、上記電圧 $V_q(t)$ が負になろうとする $t_3 \sim t_4$ の期間 T_z においては、ダイオード D 1 に電流が流れる。これは、トランスの 1 次側のインピーダンスが大きかったものが急に小さくなるものと解釈することができる。このため、ランプ印加電圧 $E(t)$ の自由な共振振動が阻害され、それに対応して、電圧 $E(t)$ に電圧変化の停止した期間 T_r が生ずる。

【0042】以上のように、フライバック方式の点灯回路の場合、ランプ印加電圧 $E(t)$ 波形上では比較的わかりにくいが、放電電流 $I_d(t)$ の立ち上がりが急峻な時間 T_a 、 T_b で放電が開始しており、この点から屈曲点 K を判別することができる。すなわち、フライバック方式のインバータ回路を用いた場合であっても、放電開始を表す屈曲点 K から次のピークまでの時間 τ を求めることができ、上記時間 τ を前記したように $2.1 \mu s$ 以下となるように、トランス T_r のインダクタンスを選定することにより、効率良くランプを点灯させることができる。

40 【0043】なお、上記したように、逆並列ダイオードが接続されている（もしくは逆並列ダイオードを内蔵している）スイッチング素子 Q を用いたフライバック方式の点灯回路の場合には、上記したように第 1 のピーク P_1 と第 2 のピーク P_2 に間に本質的な重要性のない電圧変化が停止した期間 T_s が生ずる。このため、前記した第 1、第 2 のピーク間の時間 $T_{1,2}$ は意味をもたず、前記した図 9 の関係は成立しない。以上のように、動作の途中で回路のインピーダンスが変化する場合には、本発明の適用に注意を要する。なお、逆並列ダイオードが付加された（もしくは内蔵された）スイッチング素子を用いたフルブリッジ方式、ハーフブリッジ方式、もしくはブッシュブル方式によるインバータ回路の場合には、トラン

ンスの1次側は、常に低いインピーダンスで電源に接続されているため、上記問題はおこらない。しかしながら、ゲート信号がオフになって、やがて、逆並列ダイオードに流れていた電流が停止すると、その後はインピーダンスが大きくなるため、ランプの静電容量と2次側インダクタンスで概ね決まる低い共振周波数でランプ印加電圧E(t)は共振振動を始め、リングングが消失することとなる。なお、第1ピークを過ぎても放電が終了しない場合もあり得るが、このときには、T12は、それ以後のリングング周期より若干長くなる。長くなる程度は、ランプの構造、すなわち放電プラズマ空間2のコンデンサ12の静電容量C1、誘電体5、6のコンデンサ13の静電容量C2の大きさの配分により異なる。もし、このような場合ですら、T12≤3μsが維持されるように光源装置が構成できているならば、それは望ましいことである。逆に、このような場合にT12≤3μsが満たされないものであっても、第1のピークを過ぎた後の放電は一般に弱く、紫外線発光効率に与える影響は小さいため、LC≤2.8×10⁻¹³、または、τ≤2.1μsのいずれかを満足するように光源装置を構成すればよい。なお、本発明は、放電容器の内面に蛍光体を塗布していない紫外線を放射する誘電体バリア放電ランプおよび放電容器の内面に蛍光体を塗布した可視光を放射する誘電体バリア放電ランプのいずれにも適用することができる。

【0044】

【発明の効果】以上説明したように本発明においては、①誘電体バリア放電を開始する電圧値に達した時点経過後、最大の電圧値に達してから次の最大電圧値に達するまでの時間が3μs以下となる電圧を誘電体バリア放電ランプに印加する、②誘電体バリア放電を開始する電圧値に達してから、次に新たなランプ電圧が印加されるまでの期間における最大の電圧値になるまでの時間が2.1μs以下となる電圧を誘電体バリア放電ランプに印加する、③給電装置と誘電体バリア放電ランプから構成される回路のインダクタンスをL、静電容量をCとしたとき、該インダクタンスL、静電容量CがLC≤2.8×10⁻¹³を満たすように選定したので、エキシマ分子を破壊する放電電流を速やかに切断することができ、実現可能な給電装置を使用して誘電体バリア放電ランプの発光効率を向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】誘電体バリア放電ランプ光源装置の基本構成を示す図である。

【図2】実用的な給電装置におけるランプ印加電圧E(t)、放電ギャップ電圧V1(t)、電流I_s(t)、放電電流I_d(t)の典型的な波形を示す図である。

【図3】本発明の実施例の誘電体バリア放電ランプ点灯回路（フルブリッジ方式）の一例を示す図である。

【図4】図3の点灯回路の動作を説明するための波形図である。

【図5】図3の点灯回路における印加電圧波形E(t)、電流波形I(t)の実測データを示す図である。

【図6】図3の点灯回路における印加電圧波形E(t)、電流波形I(t)の実測データを示す図（拡大図）である。

【図7】図6のY2部分を拡大し、計算により求めた放電電流波形I_d(t)を追加した図である。

10 【図8】時間τと発光効率ηの関係を示す図である。

【図9】時間T12と発光効率ηの関係を示す図である。

【図10】リングング周波数F_rと発光効率ηの関係を示す図である。

【図11】図3の点灯回路において、リングング周波数を250Hzに低下させたときの印加電圧波形E(t)、電流波形I(t)を示す図である。

【図12】他のランプの点灯波形を示す図である。

20 【図13】図12のZの部分を拡大し、計算により求めた放電電流波形I_d(t)を追加した図である。

【図14】他の点灯回路の構成例（ブッシュブル方式）を示す図である。

【図15】図14の点灯回路の動作を説明するための波形図である。

【図16】フライバック方式の点灯回路の構成例を示す図である。

【図17】フライバック方式の点灯回路を用いた場合の印加電圧波形E(t)、電流波形I(t)の実測データを示す図である。

30 【図18】フライバック方式の点灯回路を用いた場合の各部の波形を示す図である。

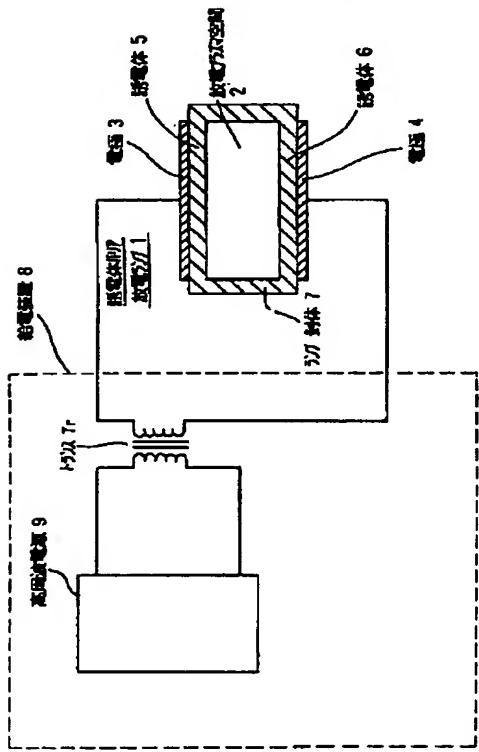
【図19】2枚の誘電体が存在する誘電体バリア放電ランプおよびその電気的な動作を表す等価回路を示す図である。

【符号の説明】

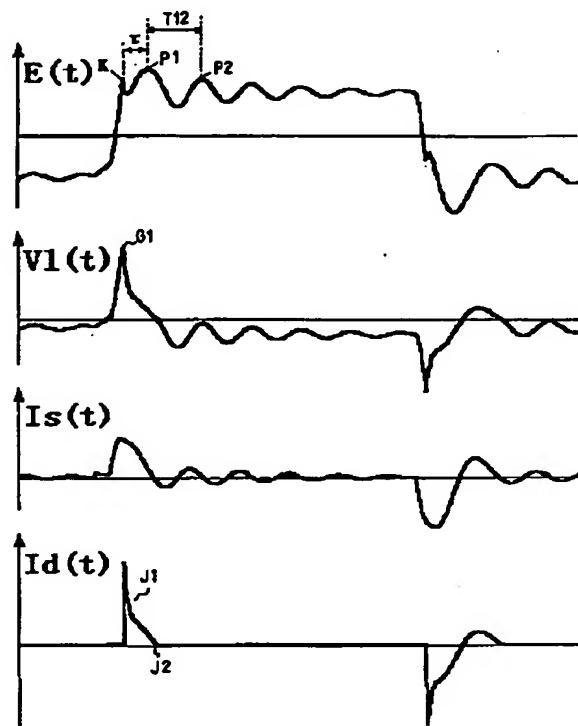
1	誘電体バリア放電ランプ
2	放電プラズマ空間
3, 4	電極
5, 6	誘電体
40 7	ランプ封体
8	給電装置
9	高周波交流電源
T _r	昇圧トランス
Q1～Q4	スイッチング素子（FET）
G _D	ゲート駆動回路
G _{D1} ～G _{D4}	ゲート駆動回路
D ₁ ～D ₄	ダイオード
D _C	電源

【図1】

誘電体バリア放電ランプ光源装置の基本構成を示す図

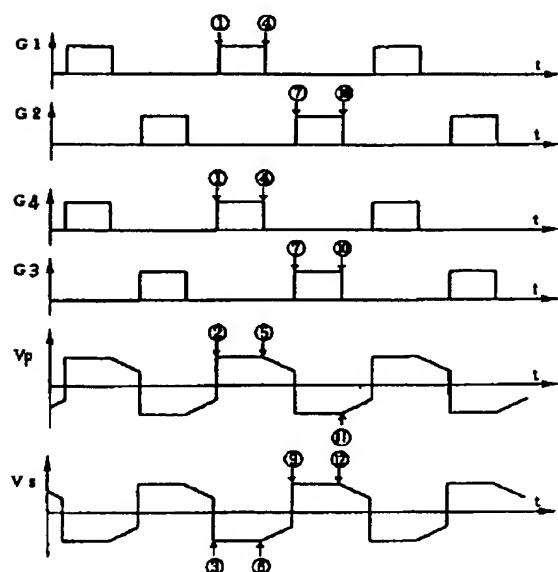


【図2】

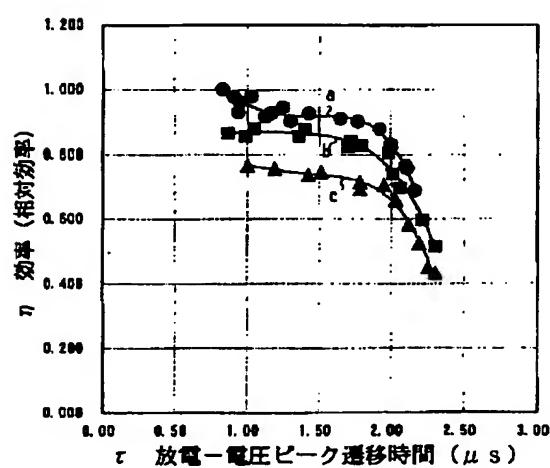
実用的な給電装置におけるランプ印加電圧 $E(t)$ 、放電ギャップ電圧 $V1(t)$ 、電流 $I_s(t)$ 、放電電流 $I_d(t)$ の典型的な波形を示す図

【図4】

図3の点灯回路の動作を説明するための波形図

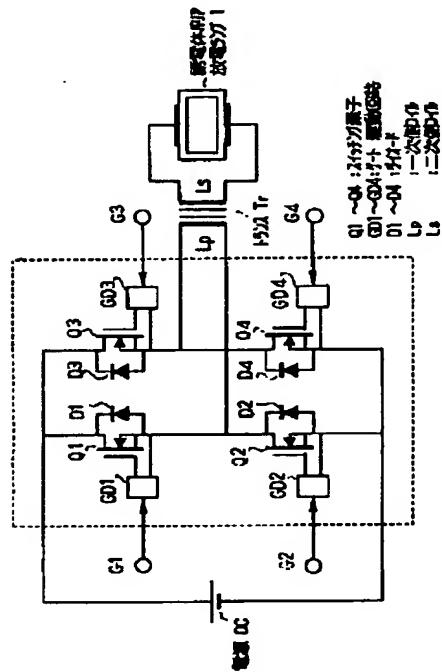


【図8】

時間 τ と発光効率 η の関係を示す図

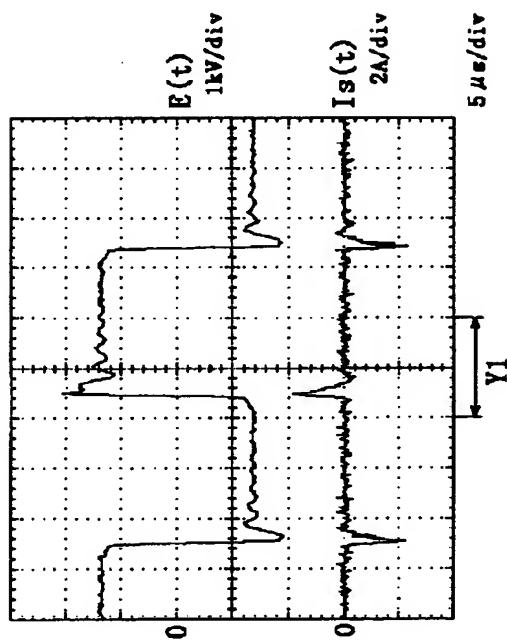
【図3】

本発明の実施例の誘電体バリア放電ランプ点灯回路
(フルブリッジ方式)の一例を示す図



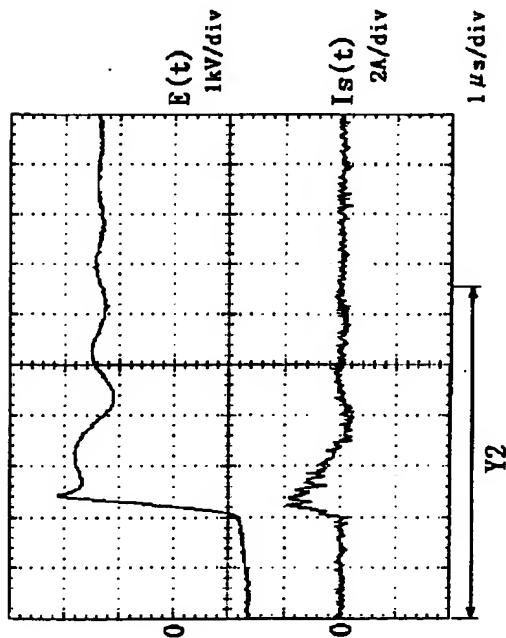
【図5】

図3の点灯回路における印加電圧波形 $E(t)$ 、電流波形 $I(t)$ の実測データを示す図



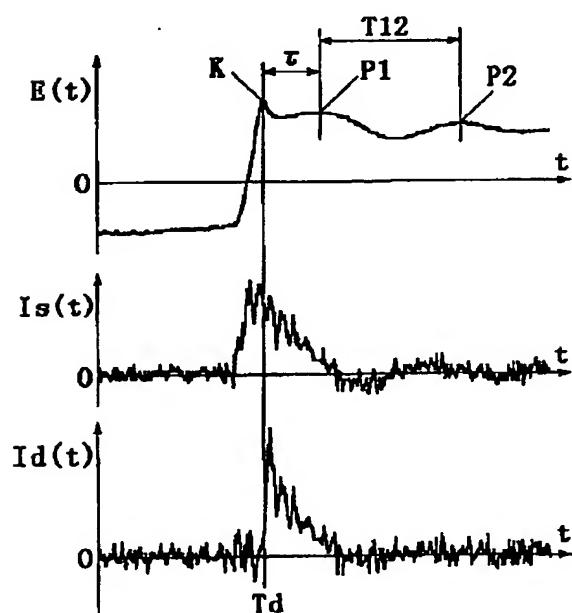
【図6】

図3の点灯回路における印加電圧波形 $E(t)$ 、電流波形 $I(t)$ の実測データを示す図(拡大図)

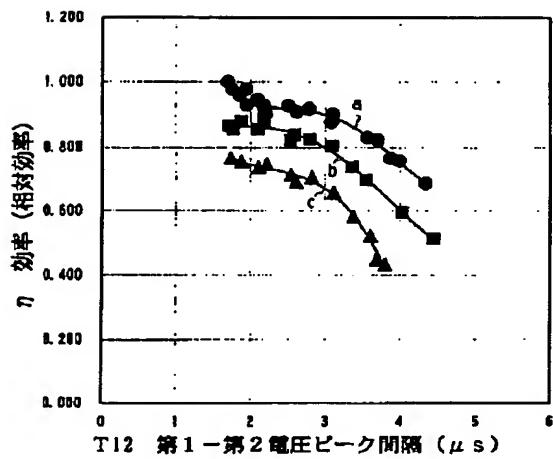


【図7】

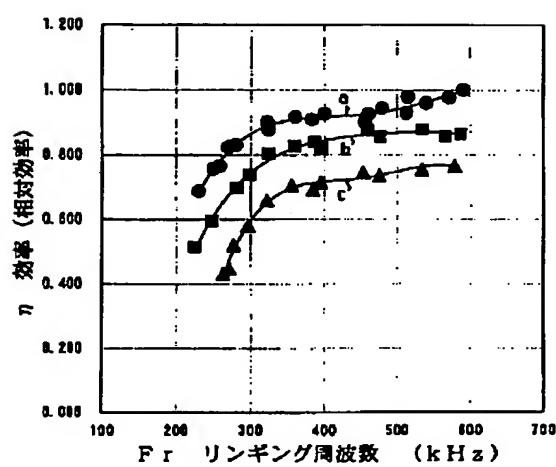
図6のY2部分を拡大し、計算により求めた放電電流波形 $I_d(t)$ を追加した図



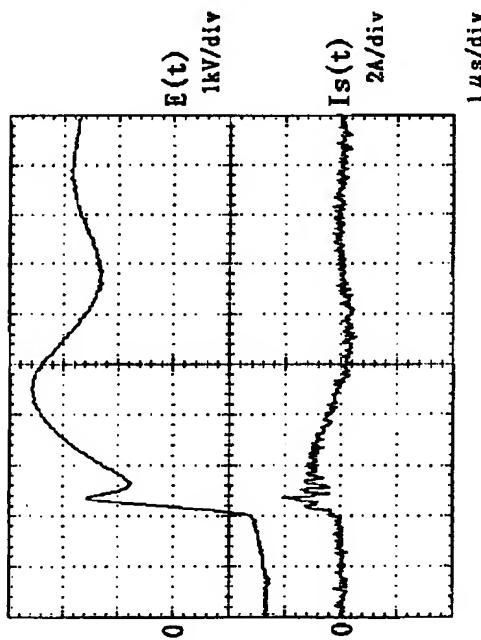
【図9】

時間 T_{12} と発光効率 η の関係を示す図

【図10】

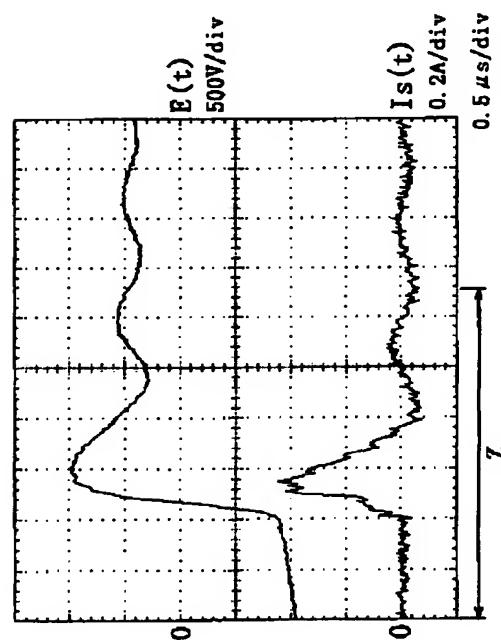
リングング周波数 F_r と発光効率 η の関係を示す図

【図11】

図3の点灯回路において、リングング周波数を250Hzに低下させたときの印加電圧波形 $E(t)$ 、電流波形 $I(t)$ を示す図

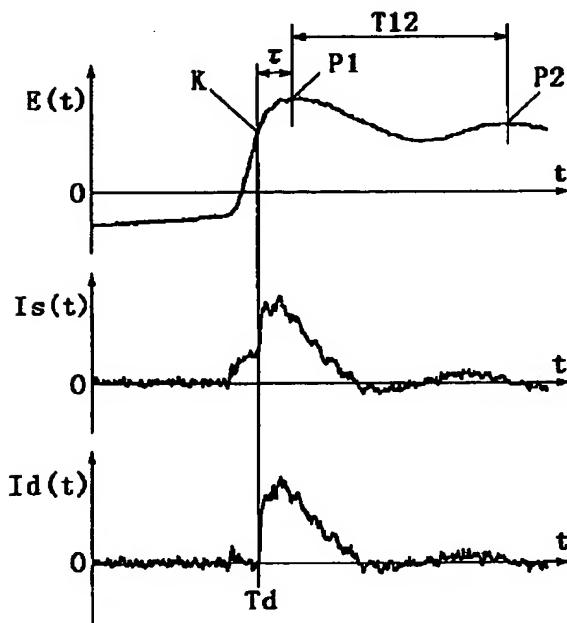
【図12】

他のランプの点灯波形を示す図



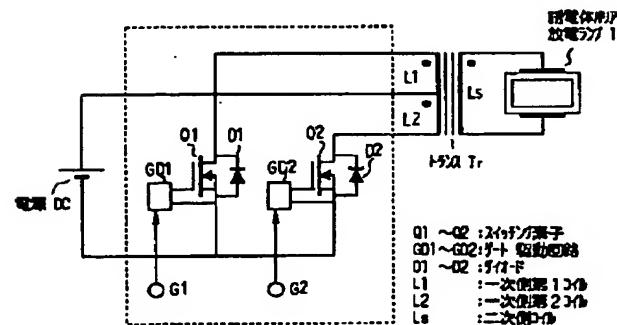
【図13】

図12のZの部分を拡大し、計算により求めた放電電流波形 $I_d(t)$ を追加した図



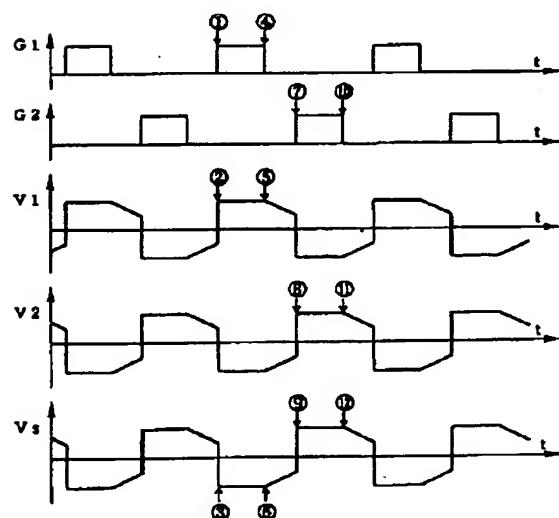
【図14】

他の点灯回路の構成例（ファッシュブル方式）を示す図



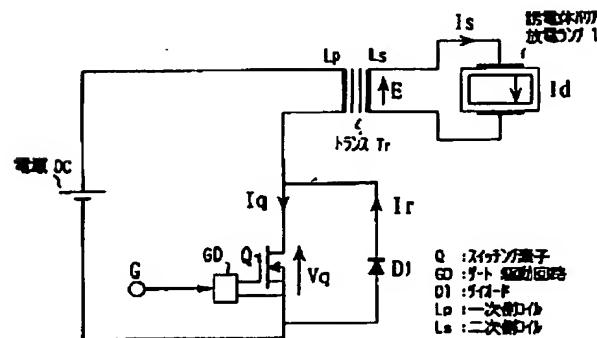
【図15】

図14の点灯回路の動作を説明するための波形図



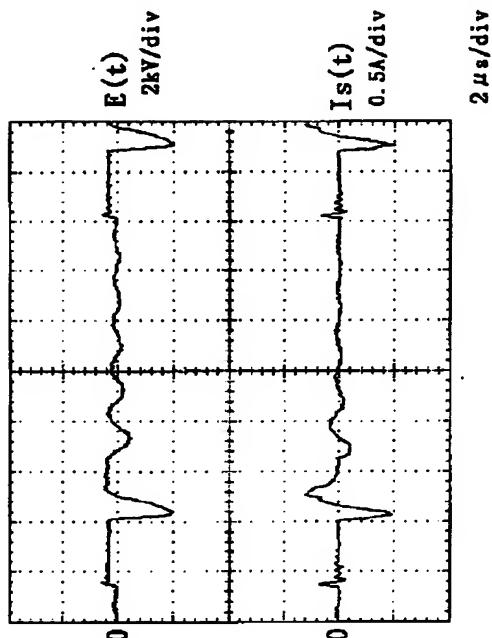
【図16】

フライバック方式の点灯回路の構成例を示す図



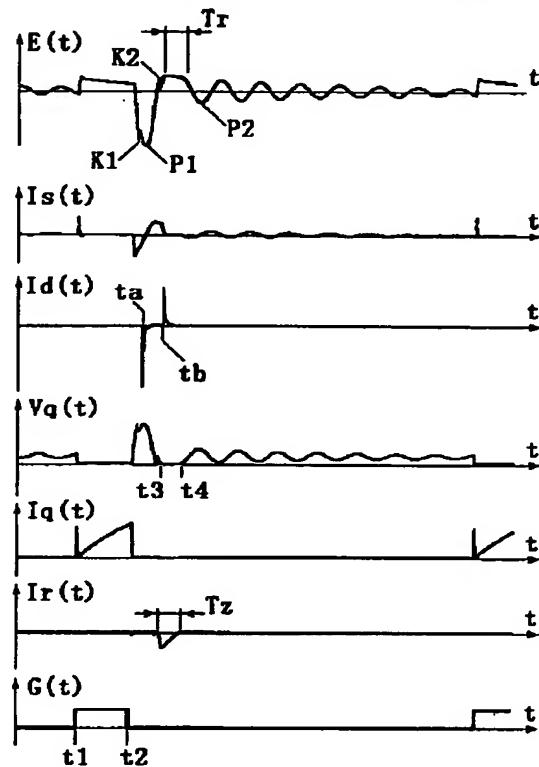
【図17】

フライバック方式の点灯回路を用いた場合の印加電圧波形 $E(t)$ 、電流波形 $I_s(t)$ の実測データを示す図



【図18】

フライバック方式の点灯回路を用いた場合の各部の波形を示す図



【図19】

2枚の誘電体が存在する誘電体バリア放電ランプおよびその電気的な動作を表す等価回路を示す図

